

变压器保护两种转角方式的比较

邓祥力, 刘世明

(烟台东方电子信息产业股份公司保护部, 山东 烟台 264000)

摘要: 对变压器保护中的 Y_0 和 Y_0 两种补偿方式进行了研究。通过理论推导得出了两种补偿方式的算法公式。针对两种转角方法, 在变压器保护中对于涌流的识别是否可以采用按相闭锁(单相闭锁单相)方案, 用 EMTP 建模进行了大量的仿真分析。理论和仿真分析的结果证明了两种转角方式在涌流识别中的相似性。

关键词: 变压器保护; 补偿方式; 涌流识别; 按相闭锁; 接地故障

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)16-0020-05

0 引言

在微机变压器保护中, 不再要求用户根据变压器绕组的接线组别, 对 CT 接线进行调整, 补偿由于变压器绕组接线组别不同而产生的幅值和相位差别, 要求把 CT 统一接成 Y 形, 便于微机保护对 CT 断线的判别。所以, 在微机变压器保护中, 在开始进行差流和各次谐波计算前, 通常都要进行转角补偿的数据预处理, 以代替用户的二次侧 CT 接线的补偿方式。

目前国内外的各大变压器保护生产厂家的变压器的补偿方式有很大的不同。国外的保护生产厂家, 如 SEL, ABB, 由于考虑到产品的全球性, 对变压器的转角补偿方式考虑得非常完善。ABB 的两圈变压器保护一共考虑 24 种转角方式, 三圈变保护考虑了 288 种转角方式, 根据用户的实际需要, 现场进行整定。SEL 的变压器保护装置的补偿方式采用每 30° 补偿一次的方法, 它甚至考虑了用户在变压器各侧 CT 连接方式的不同, 它在装置中设置了 12 个转角矩阵(每 30° 一个), 用户根据实际系统中的变压器各侧 CT 二次侧的电流相位关系, 整定各侧对应的转角矩阵, 以实现转角补偿。而国内的厂家主要针对本土市场, 转角补偿方式的数目要少得多, 一般考虑 10 种左右, 对一些国内系统中少见的连接组别组合方式不作考虑。

这么多转角方式从对比率差动算法的影响的角度出发, 大体可以归为两大类: 零序电流补偿算法 (Y_0), 如 SEL、ABB; 消零序电流算法 (Y_0), 如西门子。

转角方式的不同, 差流的涌流特征就有很大的差异。当变压器为 Y_0/Y_0 接法, 算法中不采用转角时, 每相差流就是励磁支路电流, 因而涌流特征明

显, 不会出现对称性涌流, 采用按相闭锁的方式(单相闭锁单相), 差动保护不会误动作。对于消零序电流算法 (Y_0) 的补偿方式, 由于各相差流为两相电流之差, 当两相剩磁方向相同时, 将产生对称性涌流, 涌流特征变得不明显, 各次谐波含量会低于 10%, 间断角很小, 采用按相闭锁方案时, 保护将误动作。从下文的分析可以看出, 零序电流补偿算法 (Y_0) 方式同消零序电流算法 (Y_0) 的补偿方式对涌流特征的影响相当, 采用按相制动方式时也会遇到困难。

1 算法的提出和分析

1.1 零序电流补偿法

目前, 有些厂家采用零序电流补偿法 (Y_0)。系统联络变压器和配电变压器有源侧通常接成 Y_0 形, 中性点接地, 通过零序 CT 采集中性点零序电流, 或使用三个相电流 CT 相加产生零序电流, 对 Y_0 侧的相电流进行零序补偿。对于采用变压器中性点零序 CT 进行补偿时, 装置正常运行时, 由于系统正常时没有零序电流产生, 很难检测零序 CT 极性的正确性, 只有让一侧系统停电, 通过施加额外的电源和增加额外的二次电路进行检测, 往往费时并且在很多条件下并不允许这样做。一旦接反在外部接地故障时差流中将产生两倍的零序电流, 保护将误动作。采用三个相电流 CT 相加产生零序电流, 不用让一次系统停电, 通过短接二次 CT 的方法就可以知道极性是否正确, 保护投运前就能保证有正确的零序接线。

1.1.1 转角公式

以 Y_0/Y_0 为例如图 1 所示。

传统的消零序电流 (Y_0/Y_0) 的转角公式为:

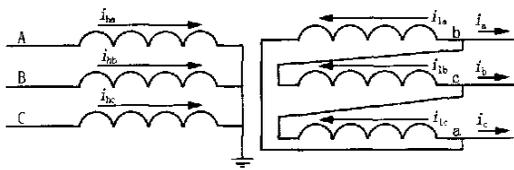


图1 变压器 Y₀/ -11 接线的绕组图

Fig.1 Circuit of Y₀/ -11 connected windings of transformer

$$\begin{bmatrix} i_{ha} \\ i_{hb} \\ i_{hc} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

i_{ha}, i_{hb}, i_{hc} 为转角以后的 Y₀ 侧 A, B, C 相电流瞬时值; i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为流过 Y₀ 侧绕组的 A, B, C 相电流瞬时值。

Y₀ 侧的零序补偿公式为 (- 11 Y₀) :

$$\begin{bmatrix} i_{ha} \\ i_{hb} \\ i_{hc} \end{bmatrix} = 1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

i_0 为 Y₀ 侧的零序电流。

- 11 侧的转角关系推导如下:

$$i_a = i_{la} - i_{lb}, i_b = i_{lb} - i_{lc}, i_c = i_{lc} - i_{la} \quad (3)$$

其中: i_a, i_b, i_c 为保护采集到的 a, b, c 相电流(侧线电流), i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为侧绕组内 a, b, c 相电流则:

$$\begin{aligned} i_a - i_c &= 3 i_{la} - 3 i_p \\ i_b - i_a &= 3 i_{lb} - 3 i_p \\ i_c - i_b &= 3 i_{lc} - 3 i_p \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $3 i_p = i_{la} + i_{lb} + i_{lc}$ 为绕组中的环流。

假设变压器一次侧、二次侧 CT 变比为 1, 转角补偿以后, 用侧绕组电流、环流表示为:

$$\begin{bmatrix} i_{cda} \\ i_{cdb} \\ i_{cde} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ha} \\ i_{hb} \\ i_{hc} \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}}{n} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}}{n} \begin{bmatrix} i_p \\ i_p \\ i_p \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

其中: $i_{cda}, i_{cdb}, i_{cde}$ 为转角以后保护的 A, B, C 相差流, n 为变压器变比。

式(5)可以简化成:

$$I_{cd} = I_{inrush} + I_0 \quad (6)$$

用线电流(保护感受到的电流)表示为:

$$\begin{bmatrix} i_{cda} \\ i_{cdb} \\ i_{cde} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ha} \\ i_{hb} \\ i_{hc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{n\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于保护不可能检测到侧绕组电流 i_{la}, i_{lb} ,

i_{lc} , 因而环流 i_p 不可知, 保护算法实际应用的公式为式(7)。

1.1.2 两种转角方式对涌流特征识别的影响

1) 对于消零序电流的补偿方式(Y₀ - 11)如式(1), 由于两相电流作差值为补偿后的电流, 各相中的各次谐波电流将以一定的初相角作差值, 使得零序性质的三次谐波受到极大的抑制(理想情况下被消去), 差流中其它各次谐波含量在一定的条件下(如两相剩磁方向相同, 由于空投于区外单相接地故障造成的相电压不对称)也会受到很大的影响, 如有的对称性涌流间断角很小, 二次谐波含量低于 10%, 涌流特征极不明显, 用波形特点或谐波含量作为识别涌流的依据原理的保护, 以按相制动的方案的保护本身就存在理论问题, 单相中涌流特征消逝, 保护误动作。

2) 零序补偿的方式(Y)如公式(7), 它的等价公式为式(5)。公式(5)中, 前两项之和(一次侧和二次侧绕组电流方向相反)正好是变压器励磁支路的电流, 由于励磁支路的非线性, 涌流特征非常明显, 后两项分别为一次侧和二次侧的零序电流, 它具有如下性质(我们将在以下的仿真分析中加以验证):

变压器在正常运行时, 由于一次系统中不存在零序电流, 公式(5)的后两项分别为零, 即 i_0, i_p 为零。差流由一次、二次绕组电流产生。

变压器正常运行时发生接地故障, 一次侧零序电流 i_0 和二次侧环流 i_p (经折算后)大小相等方向相反, 在式(5)中正好抵销掉, 差流由一、二次绕组电流产生。由于方向相反, 差流为零。

变压器空载合闸时, i_0 和 i_p 正好方向相同, 因此式(5)中的最后两项为 i_0, i_p 的代数和。由于 i_0 为一涌流性质的电流(波形和励磁涌流相似), 并且被放大了, 所以想采用零序电流补偿的方法来提高差流中的涌流特征, 想以此实现按相制动的方案是不可取的, 它同样没有解决和消掉零序电流(Y₀ - 11)的转角方法同样的问题。

2 仿真研究

变压器仿真实接线图如图 2 所示, 以下的仿真研究均以 A 相差电流为例。分以下几种情况:

2.1 变压器空载合闸时的涌流及零序电流

在各种合闸角的情况下进行了仿真, 从中选择了比较有代表意义的仿真数据。铁芯磁化曲线选用近似的两折线, 饱和前励磁电流为零, 饱和后, 直线

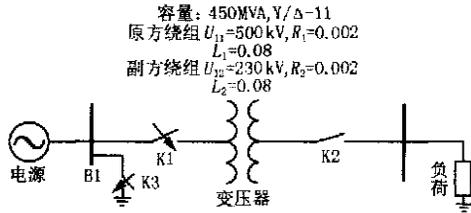


图2 变压器仿真接线图

Fig. 2 Circuit used for transformer connection simulation

斜率固定,所以以下涌流间断角明显。仿真中不考虑CT的传变误差。

在电源合闸角为零度,三相剩磁分别为0.8、0.4、-0.4,二次侧空载的情况下,在0.1s时K1开关合闸。

图3为变压器的涌流波形,图4为在变压器空载合闸的情况下,两种补偿方式转角后,A相差流的波形图,从图4中可以看出, $Y_0 - 11$ 和 $- 11 Y_0$ 两种转角方式的差流波形除了幅值上有些差别以外其他部分几乎重合,也就通过这两种转角算法以后,涌流特征几乎是一致的,看不出 $- 11 Y_0$ 能比 $Y_0 - 11$ 优越多少。

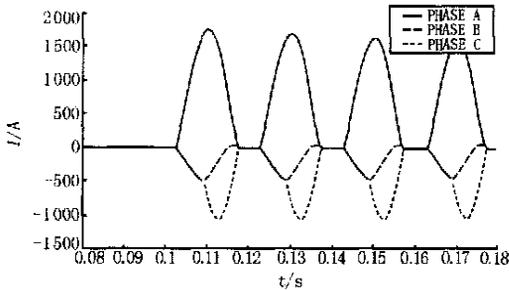


图3 Y_0 侧三相相电流波形

Fig. 3 Waveforms of three phase current at the Y_0 transformer terminal

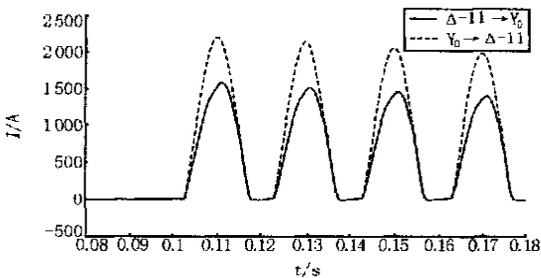


图4 A相差流 $Y_0 - 11$ 和 $- 11 Y_0$ 波形

Fig. 4 Differential current waveforms of $Y_0 - 11$ and $- 11 Y_0$ waveform from phase A

从图5可以看出,励磁支路涌流波形(式(5)的前两项即式(6)的 I_{inrush} 项)的间断角非常明显,涌流

特征相当明显,但零序电流(式(6)的 I_0 相)同样为具有间断角的特征的涌流波形,当差流为这两个波形之差时,对谐波分量的抑制作用将和 $Y - 11$ 转角相仿,没有明显的优势。

从图7和图8可以看出,一次侧零序电流 I_0 传变到二次侧产生环流 I_p ,两个电流方向相同,由式(5)可知涌流性质的零序电流被放大了。在零序补偿中($- 11 Y_0$),涌流特征将被削弱,采用按相制动的方案和消零序电流($Y_0 - 11$)的方案一样会有问题。

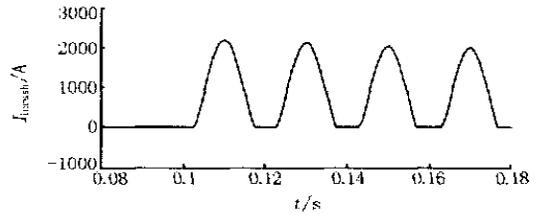


图5 I_{inrush} 的波形图

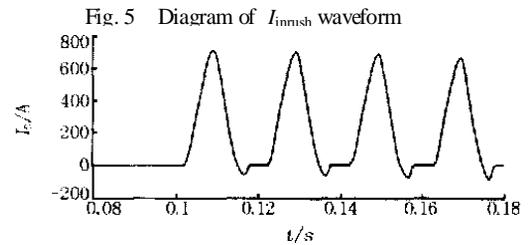


图6 I_0 的波形图

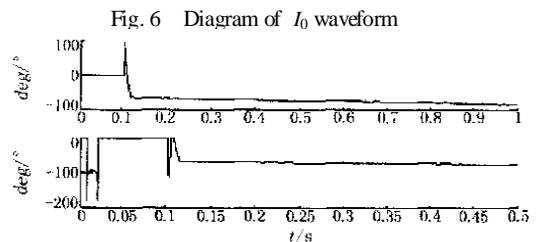


图7 一次侧零序电流和二次侧环流的相位图

Fig. 7 Phase waveforms of the primary zero sequence current and the secondary circular current

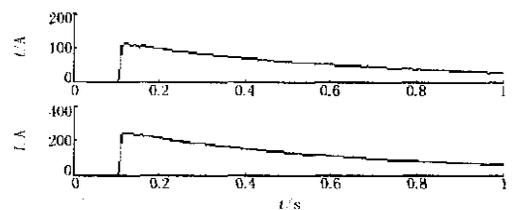


图8 一次侧零序电流和二次侧环流的幅值图

Fig. 8 Magnitude waveforms of the primary zero sequence current and the secondary circular current

从图 9~11 中可以看出,图 10 和图 11 零序电流补偿法(- 11 Y_0)的三次和五次谐波含量略优于消零序电流法(Y_0 - 11),图 11 只是在合闸后两个周波内,五次谐波含量大于消零序电流法。但上图只是在合闸角零度,三相剩磁分别为 0.8,0.4, - 0.4 的结论。我们在仿真中综合合闸角和剩磁等因数可以得出,零序电流补偿法(- 11 Y_0)和消零序电流法(Y_0 - 11)中各次谐波占基波的百分比是相当的,并且变化趋势也相同。实践和理论分析都已经证明,消零序电流(Y_0 - 11)的转角方法不宜采用按相闭锁的方案,因为转角以后的差流中各次谐波的含量可能均低于 10%,如图 9 所示。既然零序电流补偿法和消零序电流法相当,想采用按相闭锁的方案也是相当困难的。

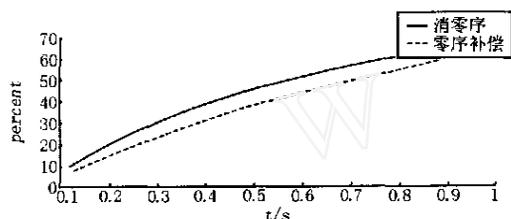


图 9 差流中两种方式中二次谐波占基波的百分数

Fig. 9 Second-harmonic blocking percentage of fundamental from the tow compensation methods

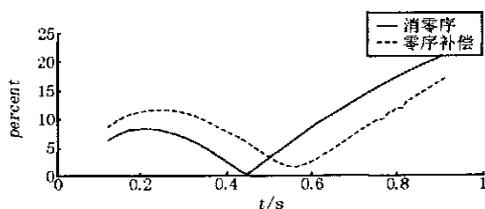


图 10 差流中两种方式中三次谐波占基波的百分数

Fig. 10 Third-harmonic blocking percentage of fundamental from the tow compensation methods

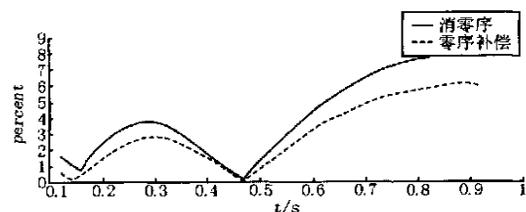


图 11 差流中两种方式中五次谐波占基波的百分数

Fig. 11 Fifth-harmonic blocking percentage of fundamental from the tow compensation methods

2.2 变压器正常运行时 k_2 点单相接地时 Y_0 侧零序电流和三角形侧环流

当变压器区外单相接地时,从图 12,图 13 可以看出,一次侧零序电流和二次侧环流方向相反大小相等,所以式(5)最后两项之和为零,差流由等式右边前两项产生,即励磁电流产生,正常运行时励磁电流很小,因此差流很小,图 14 也证实了这一点。

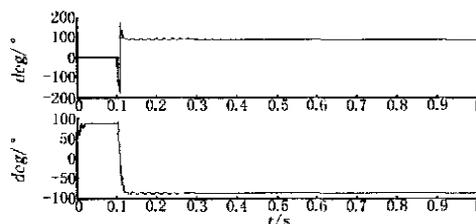


图 12 变压器区外单相接地时一次侧零序电流和二次侧环流的相位图

Fig. 12 Phase waveforms of I_0 and I_p when single phase grounded is out of protection section

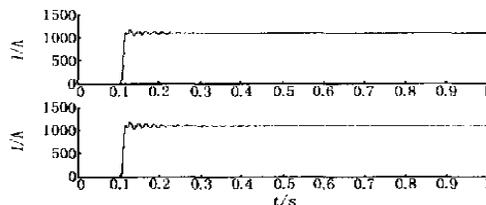


图 13 变压器区外单相接地时一次侧零序电流和二次侧环流的幅值图

Fig. 13 Magnitude waveforms of I_0 and I_p when single phase grounded is out of protection section

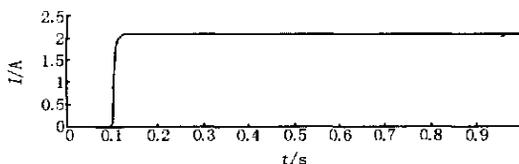


图 14 变压器区外单相接地时的 A 相差流

Fig. 14 Differential current of phase A when single phase grounded is out of protection section

3 结论

本文通过理论推导,得到零序电流补偿法和消零序电流法的转角公式,并在这一公式的基础上导出了便于理论分析和算法仿真的线性方程,并使用这一理论分析的线性方程用 EMTP 搭建模型进行了仿真分析,得到了以下结论:

- 1) 对于 $Y_0/$ 接线的变压器, 侧的环流由 Y_0

侧的零序电流产生,并且在空载合闸时 Y_0 侧的零序电流和 侧的环流方向相同,在正常运行和区外单相接地故障时, Y_0 侧的零序电流和 侧的环流方向相反,大小相等。

2) 采用零序补偿法时(- 11 Y_0),在空载合闸时差流中的 Y_0 侧的零序电流被放大了两倍以上,在变压器正常运行和区外单相接地故障时,差流不受零序电流的影响。

零序电流补偿法(- 11 Y_0)和消零序电流法(Y_0 - 11),在识别变压器涌流的能力上相当,在合闸角零度,三相剩磁 0.8,0.4, - 0.4 时各次谐波含量均小于 10%,按相制动的变压器保护将要发生误动作。

参考文献:

[1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与

应用(The Principle and Application of Protection for Main Electrical Equipment) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1996.

[2] Gcar B, Dolinar D. Integrated Digital Power Transformer Protection[J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib,1994, 141(4).

[3] 陈增田(CHEN Zeng-tian). 电力变压器保护(第二版)(Power Transformer Protection, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-11-28; 修回日期: 2004-03-24

作者简介:

邓祥力(1973-),男,硕士,工程师,从事超高压保护的开
发; E-mail: xiangli989@hotmail.com

刘世明(1972-),男,博士后,从事超高压保护的开
发与研究。

Comparison of two current compensation methods in transformer protection

DENG Xiang-li, LIU Shi-ming

(Yantai Dongfang Electronics Information Industry Co., Ltd, Yantai 264000, China)

Abstract: This paper analyzes the two current compensation methods of Y and Y . Through theoretical and logical reasoning, the algorithmic equations of the two current compensations for current transformer used by transformer protection are obtained. With a large number of simulation data from the transformer model with EMTP, the possibility of realizing the dependent harmonic blocking technique for transformer protection using by the two current compensation methods is analyzed. The results from the theoretical analysis and simulation prove the similarity of the two methods in the distinguishing fault and inrush current.

Key words: transformer protection; current compensation; inrush current distinguishing; dependent harmonic blocking technique; ground fault

(上接第 11 页 continued from page 11)

[4] Anderson P M, Fouad A A. 电力系统的控制与稳定(Power System Control and Stability) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1979.

[5] 王锡凡,方万良,杜正春(WANG Xi-fan, FANG Warr-liang, DU Zheng-chun). 现代电力系统分析(Modern Power Systems Analysis) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),2003.

收稿日期: 2003-12-03; 修回日期: 2004-01-07

作者简介:

杨大志(1978-),男,硕士研究生,从事电力系统稳定控制方面的研究工作; E-mail: cai9good@sina.com

杜正春(1963-),男,博士,副教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作;

方万良(1958-),男,博士,副教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

Design and study of variable-structure excitation controller for multi-machine power systems

YANG Da-zhi, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on multi-machine nonlinear models, using state-feedback accurate linearization method and variable-structure control theory, this paper develops a new variable-structure excitation controller for multi-machine power system. In this design, the referenced machine is cancelled, and the multi-machine disperse control is realized. The simulation result of three-machine system shows that this variable-structure excitation control can effectively improve power system transient stability under big disturbance.

Key words: variable-structure control; accurate linearization; power system stability; excitation system